

河北雨洪模型中下渗公式的一种改进方法

孔凡哲¹,程双虎²,胡春歧²,马存湖²

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;2.河北省水文水资源勘测局,河北 石家庄 050031)

摘要:下渗强度的计算是干旱半干旱地区超渗产流计算的关键环节。河北雨洪模型中的流域下渗强度计算公式由两部分组成,一部分为由张力引起的下渗强度,另一部分为由重力引起的下渗强度(稳定下渗能力)。计算以上两部分下渗强度时,公式所用的雨量有重复,致使总下渗强度普遍偏大,从而导致模型模拟的洪水过程的洪量及洪峰偏小。提出一个改进的流域下渗强度计算公式,计算张力引起的下渗时所用雨强为总雨强与稳定下渗能力的差值。利用改进前后的计算公式,分别对 2mm/h 到 10mm/h 雨强及 0mm 到 140mm 表层土湿条件下的下渗强度进行计算,并对结果进行对比分析。大阁流域的实例应用结果表明,改进后的下渗强度计算公式,对模拟洪水过程的洪量和洪峰流量的增加效果明显,增加值分别为实测值的 14.14% 和 10.08%。

关键词:河北雨洪模型;降雨强度;下渗强度;稳定下渗能力;下渗公式

中图分类号:P338

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)03-0011-06

1933年,Horton提出了最早的产流理论—下渗理论,理论认为,当雨强小于下渗能力时,所有降雨都被土壤吸收;雨强大于下渗能力时,下渗率等于下渗能力,超过下渗率的部分形成地表径流^[1]。根据Horton理论,计算产流的前提是计算下渗能力。Green-Ampt和Horton分别于1911年^[2]和1939年^[3]提出了在充分供水条件下,均质土壤的下渗能力公式,计算公式均描述了充分供水条件下,下渗能力随时间的变化特征。在供水不充分的情况下,下渗能力公式是不能用的,通常情况是建立下渗能力与累计下渗水量的关系^[4-5],从而可以根据累计下渗水量(土壤含水量),确定下渗能力。另一方面,Green-Ampt和Horton公式是针对流域内一点或下垫面特性空间分布均匀的流域而言,而实际情况是流域下垫面空间部分不均匀,目前大都采用下渗能力分布曲线来表征该空间分布特征^[5]。根据Horton下渗理论和下渗能力分布曲线,河北省水文局于1995~1998年研发出了可用于干旱和半干旱地区的下渗强度计算公式,对于某一降雨强度,公式可以根据土层完全干燥时的下渗强度,计算出与任意土层湿度

对应的下渗强度,在此基础上研发出了河北省雨洪模型^[6-7],该模型在河北省得到了广泛应用。本文针对河北模型中下渗强度计算公式存在的问题及改进途径进行初步研究。

1 河北模型产流计算方法

1.1 流域下渗曲线

参照陕北团山沟实验站资料,河北模型中采用的流域下渗曲线为:

$$f = Me^{-u} + f_c \quad (1)$$

式中: I 为表层土壤湿度,称为表土湿度,mm, $I = XPa + Ft$; Pa 为前期影响雨量,mm; X 为前期影响雨量的消退系数; Ft 为累计下渗雨量,mm; f 为与 I 对应的下渗能力,mm/h; M 为表层完全干燥时由张力引起的下渗雨量,mm/h; u 为指数; f_c 为稳定下渗能力,mm/h。模型假定流域各点的稳定下渗强度是相同的。

1.2 下渗能力分配曲线

下渗能力分配曲线为下渗能力累计频率曲线,纵

坐标为下渗能力 f ，横坐标为小于或等于某一下渗能力所占面积与流域面积的比值。下渗能力分配曲线可用于计算与实际降雨强度对应的流域实际下渗水量。

河北雨洪模型中采用的由张力引起的土层完全干燥时的下渗能力分配曲线的线型为抛物线型，即

$$\alpha = \left(\frac{f}{f_m}\right)^n \quad (2)$$

对应的图形如图 1 所示。

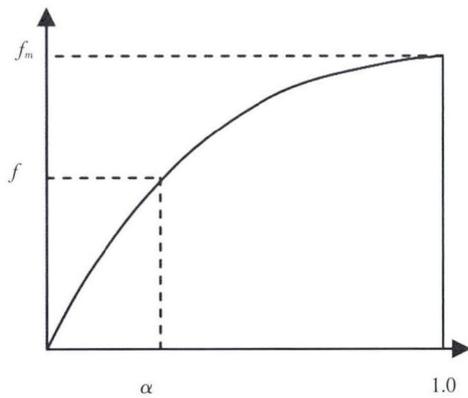


图 1 下渗能力分配曲线

Fig.1 Distribution of the infiltration capacity

根据图 1，任一雨强 i 对应的下渗水量 f_a 如图 2 中阴影部分，计算公式为：

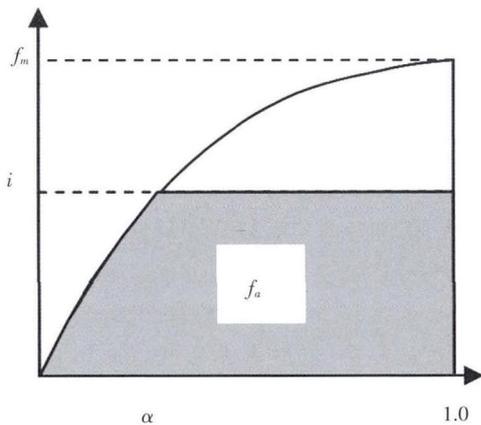


图 2 流域平均下渗水量 ($i < f_m$)

Fig.2 The watershed infiltration value ($i < f_m$)

$$f_a = \int_0^i \left[1 - \left(\frac{f}{f_m}\right)^n\right] df \quad (3)$$

对式(3)积分后有：

$i < f_m$ 时

$$f_a = i - \frac{i^{1+n}}{f_m^n (1+n)} \quad (4)$$

如图 2 所示。

$i \geq f_m$ 时

$$f_a = f_m - \frac{f_m}{1+n} \quad (5)$$

如图 3 所示。

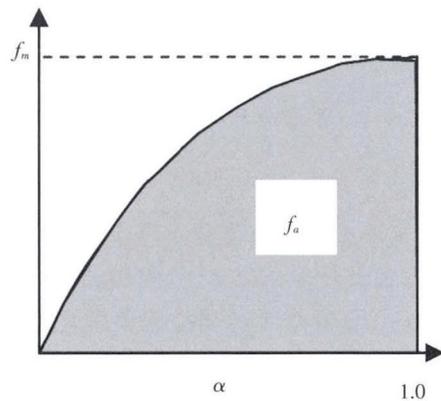


图 3 流域平均下渗水量 ($i \geq f_m$)

Fig.3 The watershed infiltration value ($i \geq f_m$)

河北模型假定随着表土湿度 I 的变化，流域有不同的下渗能力分配曲线，但曲线的 f_m 保持不变，如图 4 所示。根据图 4 可以看出：(1)同样的表土湿度，不同时段雨强 i 对应的流域实际下渗水量不同；(2)同样的时段雨强 i ，不同的表土湿度 I 具有不同的流域下渗水量。

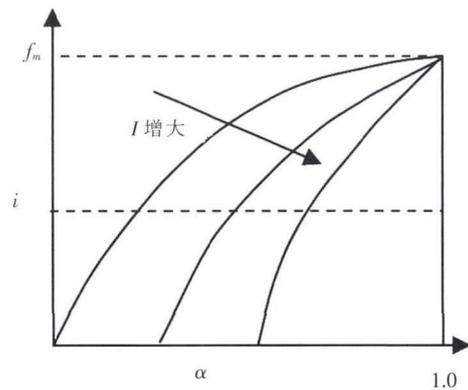


图 4 下渗能力分配曲线随 I 变化图

Fig.4 The relation between the infiltration capacity and I

1.3 流域下渗强度计算公式

将下渗曲线与下渗能力分配曲线进行组合，组合后得到能够直接用来计算考虑下渗能力空间分布不均情况下的流域实际下渗强度（或时段下渗水量）。分别从 $i < f_c$ 、 $f_c < i \leq f_m$ 及 $i > f_m$ 三种情况进行分析。

(1) $f_c < i \leq f_m$ 时

对于某一雨强 i ，在表土完全干燥情况下根据式(4)有：

$$M=i-\frac{i^{1+n}}{f_m^n(1+n)} \quad (6)$$

当表层土湿为 I 时,将 M 带入下渗曲线公式(1)后有

$$f=[i-\frac{i^{1+n}}{f_m^n(1+n)}]e^{-uI}+f_c \quad (7)$$

式(7)即为河北模型所用的,考虑下渗分配不均,受控于流域表层土壤湿度的流域下渗强度计算公式。

(2) $i > f_m$ 时

根据式(5)有:

$$M=f_m-\frac{f_m}{1+n} \quad (8)$$

将 M 带入下渗曲线公式(1)后有:

$$f=[f_m-\frac{f_m}{1+n}]e^{-uI}+f_c \quad (9)$$

(3) $i < f_c$ 时

$$f=i \quad (10)$$

1.4 下渗强度计算公式存在的问题

对于某一降雨量 i , 其对应的下渗水量包括两部分,一部分是重力作用形成的 f_c , 另一部分是由张力形成的 M , 而形成 M 的降雨应该是从总降雨中扣除 f_c 以后的雨量, 因此, 式(7)中的 i 存在重复问题, 所以使计算结果系统偏大, 同时, 还会出现计算的下渗强度大于实际降雨强度的不合理现象。表1为利用河北新盖房流域参数计算的结果, 灰色部分为下渗强度大于实际降雨强度的值。

表1 下渗强度计算结果 (mm/h)
Table1 The computed infiltration rates (mm/h)

I	i								
	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$
0	3.48	4.45	5.42	6.37	7.33	8.27	9.21	10.14	11.06
10	3.38	4.31	5.23	6.14	7.04	7.94	8.83	9.72	10.60
20	3.29	4.17	5.04	5.91	6.77	7.63	8.47	9.32	10.15
30	3.20	4.04	4.87	5.70	6.51	7.33	8.13	8.94	9.73
40	3.12	3.92	4.71	5.49	6.27	7.04	7.81	8.57	9.33
50	3.04	3.80	4.55	5.30	6.04	6.77	7.50	8.23	8.95
60	2.96	3.69	4.40	5.11	5.82	6.52	7.21	7.90	8.58
70	2.89	3.58	4.26	4.93	5.61	6.27	6.93	7.59	8.24
80	2.82	3.48	4.12	4.77	5.41	6.04	6.67	7.29	7.91
90	2.76	3.38	4.00	4.61	5.21	5.82	6.41	7.01	7.60
100	2.70	3.29	3.88	4.46	5.03	5.61	6.17	6.74	7.30
110	2.64	3.20	3.76	4.31	4.86	5.41	5.95	6.48	7.02
120	2.58	3.12	3.65	4.18	4.70	5.22	5.73	6.24	6.75
130	2.53	3.04	3.54	4.04	4.54	5.03	5.52	6.01	6.49
140	2.48	2.96	3.44	3.92	4.39	4.86	5.33	5.79	6.25

注:表中所用参数: $f_m=240\text{mm/h}$, $n=0.8$, $f_c=1.5\text{mm/h}$, $u=0.005$

2 下渗公式的改进

2.1 公式形式

根据下渗强度通用公式, 河北模型假定降雨下渗损失首先满足重力作用下的损失部分 f_c , 然后是张力作用下的下渗。在此假定下, 实际应用时的下渗计算公式改为:

(1) $0 < i - f_c \leq f_m$ 时

$$f=[(i-f_c)-\frac{(i-f_c)^{1+n}}{f_m^n(1+n)}]e^{-uI}+f_c \quad (11)$$

(2) $i - f_c > f_m$ 时

计算公式与式(9)相同。

(3) $i - f_c < 0$ 时

计算公式与式(10)相同。

1.2 中已经强调说明, 河北模型中采用的抛物线型下渗能力分配曲线, 是针对由张力引起的下渗水量的, 因此, 此处的改进意味着图2, 图4, 和式(3), (4), (5)及判别条件中的 i , 均应该为 $(i - f_c)$ 。

改进后的计算结果如表2。根据表2可以看出, 改进后的计算结果中, 不再出现下渗水量大于降雨量的不合理现象。

表2 改进后的下渗强度计算结果 (mm/h)
Table2 The modified computed infiltration rates (mm/h)

I	i								
	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$
0	2.00	2.99	3.96	4.93	5.90	6.85	7.80	8.74	9.67
10	1.97	2.91	3.84	4.77	5.68	6.59	7.49	8.39	9.28
20	1.95	2.84	3.73	4.61	5.48	6.34	7.20	8.05	8.90
30	1.93	2.78	3.62	4.46	5.28	6.11	6.92	7.73	8.54
40	1.91	2.72	3.52	4.31	5.10	5.88	6.66	7.43	8.19
50	1.89	2.66	3.42	4.17	4.92	5.67	6.41	7.14	7.87
60	1.87	2.60	3.33	4.04	4.76	5.46	6.17	6.86	7.56
70	1.85	2.55	3.24	3.92	4.60	5.27	5.94	6.60	7.26
80	1.83	2.50	3.15	3.80	4.45	5.09	5.72	6.35	6.98
90	1.82	2.45	3.07	3.69	4.30	4.91	5.52	6.12	6.71
100	1.80	2.40	2.99	3.58	4.17	4.75	5.32	5.89	6.46
110	1.79	2.36	2.92	3.48	4.04	4.59	5.13	5.68	6.22
120	1.77	2.32	2.85	3.38	3.91	4.44	4.96	5.47	5.99
130	1.76	2.28	2.79	3.29	3.80	4.29	4.79	5.28	5.77
140	1.75	2.24	2.72	3.21	3.68	4.16	4.63	5.10	5.56

表中所用参数: $f_m=240\text{mm}$, $n=0.8$, $f_c=1.5\text{mm}$, $u=0.005$

表3 差值计算表
Table3 The computed differences

I	i									
	$i=2$		$i=4$		$i=6$		$i=8$		$i=10$	
	r_j	r_x	r_j	r_x	r_j	r_x	r_j	r_x	r_j	r_x
0	1.48	74	1.45	36	1.43	24	1.41	18	1.39	14
10	1.41	70	1.38	35	1.36	23	1.34	17	1.32	13
20	1.34	67	1.31	33	1.29	22	1.27	16	1.26	13
30	1.27	64	1.25	31	1.23	21	1.21	15	1.20	12
40	1.21	60	1.19	30	1.17	20	1.15	14	1.14	11
50	1.15	58	1.13	28	1.11	19	1.10	14	1.08	11
60	1.09	55	1.08	27	1.06	18	1.04	13	1.03	10
70	1.04	52	1.02	26	1.01	17	0.99	12	0.98	10
80	0.99	50	0.97	24	0.96	16	0.94	12	0.93	9
90	0.94	47	0.93	23	0.91	15	0.90	11	0.89	9
100	0.90	45	0.88	22	0.87	14	0.85	11	0.84	8
110	0.85	43	0.84	21	0.82	14	0.81	10	0.80	8
120	0.81	41	0.80	20	0.78	13	0.77	10	0.76	8
130	0.77	39	0.76	19	0.75	12	0.74	9	0.73	7
140	0.73	37	0.72	18	0.71	12	0.70	9	0.69	7

表中所用参数: $f_m=240\text{mm}$, $n=0.8$, $f_c=1.5\text{mm}$, $u=0.005$

2.2 改进前后计算结果分析

采用改进前后两种计算公式, 对不同雨强和表土湿度组合情况下计算的下渗强度进行对比分析。对比分析时采用两种指标, 一个是绝对差值, 定义为

$$r_j = f_{\text{原}} - f_{\text{新}} \quad (12)$$

式中: r_j 为绝对差值 (mm/h); $f_{\text{原}}$ 为原公式计算结果 (mm/h); $f_{\text{新}}$ 为改进后公式计算结果 (mm/h)。计算结果如表 3。第二个指标为相对差值, 定义为

$$r_x = \frac{f_{\text{原}} - f_{\text{新}}}{i} \times 100\% \quad (13)$$

式中: r_x 为相对差值 (%); i 为雨强 (mm/h); 其它变量含义同上。计算结果如表 3 所示。

根据表 3 可以看出: (1) 同样的降雨强度, 随着表土湿度的增加, 差值减小明显; (2) 同样的表土湿度, 随着雨强的增加, 绝对差值和相对差值均减小, 但绝对差值减小不明显, 而相对差值减小非常明显, 说明随着雨强的增加, 两种方法计算结果的差值对洪水计算结果

的影响在减弱。

3 应用实例

3.1 流域概况及模拟方法

研究流域为位于河北省丰宁满族自治县境内的大阁水文站以上集水区域,集水面积为 1 858km²。

采用分散式水文模型进行流量过程模拟计算,小流域划分如图 5 所示。在每一个计算单元内,分别采用改进前后的公式计算时段下渗水量;地面径流产流计算及地下径流产汇流计算采用河北雨洪模型中的方法^[6];地面径流汇流计算采用分布式单位线法^[8];河道洪水演进采用动态马斯京根法^[9]。

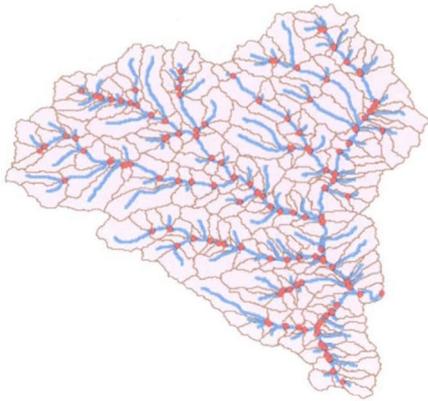


图 5 大阁流域图
Fig.5 The Dage watershed

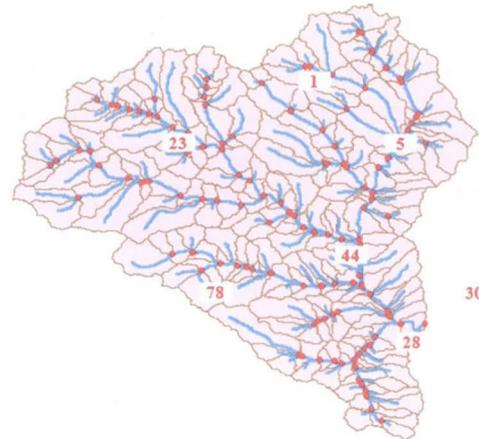
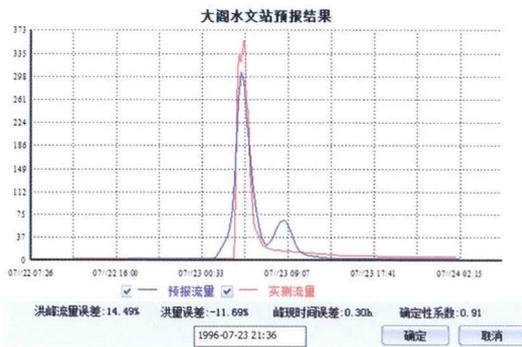


图 6 雨量分布图
Fig.6 Distribution of the rainfall

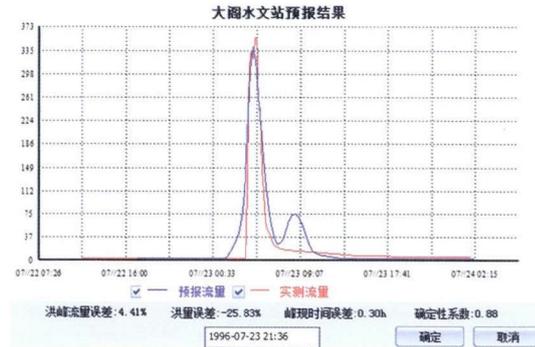
3.2 模拟结果及对比分析

采用改进前后两种下渗计算公式,对大阁水文站

1996 年 7 月 23 日的一次洪水过程(雨量及分布如图 6 所示)进行模拟,模拟结果如图 7 及表 4 所示。



(a) 改进前
(a) The result of the original equation



(b) 改进后
(b) The result of the modified equation

图 7 模拟结果
Fig.7 The simulated results

表4 模拟计算结果对比
Table4 Comparison between the simulated results

	洪峰流量相对误差/%	洪量相对误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数
改进前	14.49	-11.69	0.3	0.91
改进后	4.41	-25.83	0.3	0.88

根据模拟结果可以看出,对于 1996 年 7 月 23 日的洪水,在其它条件完全相同的情况下,改进后计算的径流量增加值为实测径流量的 14.14%,洪峰增加值为实测洪峰流量的 10.08%,可见增加幅度比较明显。

4 结论

下渗强度计算公式,是干旱半干旱地区产流计算的关键,通过对河北雨洪模型所用下渗强度计算公式的研究,可以得出以下结论:

(1)当雨强大于稳定下渗能力时,现行计算公式分别计算由张力和重力形成的下渗水量所用的雨量有重复,使计算的总下渗强度普遍偏大,同时造成计算的下渗强度大于降雨强度的不合理现象。改进后的下渗强度计算公式,消除了原公式计算结果中的这一不合理现象。

(2)根据对 2~10mm/h 雨强,0~140mm 表层土湿条件下的计算结果可以看出:各情况下改进前后两公式计算结果的绝对差值相差不明显,最小值为0.69mm,最大值 1.78mm;相对差值相差却很明显,最小值 7%,而最大值 74%,雨强越小,差值越大。

(3)下渗强度计算结果偏大,意味着产流计算结果偏小,会直接影响到水文模型模拟的径流量和洪峰流量。根据对大阁水文站 1996 年 7 月 23 日的洪水过程模拟结果可以看出,利用改进后下渗强度计算公式的模型,模拟洪量的增加值为实测径流量的 14.14%,模拟洪峰的增加值为实测洪峰流量的 10.08%,增加效果明显。

参考文献:

[1] Horton R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1933,14:446-460
 [2] Green, W.H., Ampt, G.A. Studies in soil physics 1: the flow of air and water through soils [J]. Journal of Agricultural Science, 1911,4:

1-24.

[3] Horton R E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity [J]. Transaction, American Geophysical Union, 1939,20:693-711
 [4] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZHAO Renjun. Hydrological Simulation on Stream-Xin'anjiang Model and Shanbei Model [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1984. (in Chinese))
 [5] 文康,金管生,李蝶娟,等. 地表径流过程的数学模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990. (WEN Kang, JIN Guansheng, LI Diejuan, et al. The Mathematical Simulation of Surface Runoff Process[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1990. (in Chinese))
 [6] 水利部水文局, 长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (Bureau of Hydrology, MWR, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. Hand Book of Hydrological Information and Forecast [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
 [7] 韩家田. 河北模型在岩溶地区洪水预报中的应用[J]. 水文, 2002,22(3):26-28. (HAN Jiatian. Application of the Hebei model in flood forecasting for karst regions[J]. Journal of China Hydrology, 2002,22(3):26-28. (in Chinese))
 [8] 孔凡哲,王晓赞. 一个基于 DEM 的半分布式水文模型[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(5):596-600. (KONG Fanzhe, WANG Xiaozan. A semi-distributed hydrological model based on DEM[J]. Journal of Wuhan University (Engineering), 2009,42(5):596-600. (in Chinese))
 [9] 孔凡哲,王晓赞. 基于河段特征的马斯京根模型参数估算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2008,37(3):494-497. (KONG Fanzhe, WANG Xiaozan. Method estimating Muskingum model parameters based on physical characteristics of river reach[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,37(3):494-497. (in Chinese))

A Method for Modifying Infiltration Equation Used in Hebei Model

KONG Fanzhe¹, CHENG Shuanghu², HU Chunqi², MA Cunhu²

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The computation of infiltration rate is a key step for estimating the infiltration excess runoff in dry and semi-dry regions. The infiltration equation used in Hebei model is made of two parts, the one is the infiltration rate governed by tension and the other is that governed by gravity (the constant infiltration capacity). Because of the repetition of rainfall rate used to compute the two infiltration rates, the total infiltration rate is always greater than it should be and as a consequence, the runoff amount and the peak discharge of the hydrograph simulated by the hydrological model is decreased. A modified infiltration equation is presented, in which the rainfall rate used to compute the infiltration rate governed by tension is the difference between the total rainfall rate and the constant infiltration capacity. Computation for the modified infiltration equation and the original one under conditions for rainfall rates ranging from 2 mm/h to 10 mm/h and initial water content ranging from 0 mm to 140 mm are carried out, and the results from the two infiltration equation are compared. It can be seen from the results of the Dage watershed by the modified infiltration equation that the runoff amount and the peak discharge of the hydrograph simulated are increased 14.14% and 10.08% respectively.

Key words: Hebei model; rainfall rate; infiltration rate; constant infiltration capacity; infiltration equation